

Исследование схемы медленного вывода пучка из синхротрона У-10

Н.Н. Алексеев, А.Е. Большаков, Ю.М. Горячев, В.А. Щеголев
Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва, Россия

Для медленного вывода пучка из синхротрона У-10 используется нелинейный резонанс третьего порядка в вертикальной плоскости. Пучок выводится с помощью септумного магнита конструкции Ламбертсона, отклоняющего выводимые частицы в горизонтальной плоскости на угол, достаточный для выхода за апертуру вакуумной камеры. Исследовалась зависимость эффективности медленного вывода и характеристик выведенного пучка от параметров пучка, а также от октупольного и декапольного возмущения магнитного поля. Приводятся экспериментальные данные и результаты численного моделирования. Показано, что декапольное возмущения магнитного поля может приводить к увеличению эффективности медленного вывода на секступольном резонансе.

Введение

Протонный синхротрон У-10 эксплуатируется в режиме ускорения протонного пучка до энергии от 1 до 9,3 ГэВ и генерации вторичных пучков на внутренних мишенях. Система медленного вывода пучка создавалась в связи с реализацией в ИТЭФ проекта сооружения на основе протонного синхротрона протон-ионного ускорительного комплекса [1] и предназначалась для вывода из У-10 ускоренных пучков тяжелых ионов. Так как интенсивность ионных пучков планировалось иметь невысокой, проблема получения предельной эффективности медленного вывода не стояла очень остро, поэтому была выбрана простейшая схема вывода пучка на секступольном резонансе с использованием несложного по конструкции и компактного септумного магнита, геометрия которого позволяет рассчитывать на эффективность вывода порядка 60%. В настоящее время система находится в опытной эксплуатации: выведенный протонный пучок используется для облучения образцов в трансмутационных исследованиях.

Схема медленного вывода показана на рис.1. Резонанс третьего порядка $3Q_z=28$ возбуждается с помощью одиночной секступольной линзы. Септумный магнит размещается в прямолинейном промежутке между двумя четырехполюсными магнитами, с помощью которых создается местное искажение равновесной орбиты, обводящее пучок мимо ножа септумного магнита при инжекции и ускорении. Частицы, отклоненные септумным магнитом, выходят за пределы апертуры вакуумной камеры в промежутке 203–204 и направляются в существующие каналы транспортировки вторичных частиц. При выбранном положении септумного магнита возможны два варианта вывода пучка. В первом варианте пучок отклоняется септумным магнитом на отрицательный угол (внутри кольца) и направляется в оптические каналы 211; 212; 215. Во втором варианте пучок отклоняется септумным магнитом в положительном направлении (наружу от кольца) и направляется в канал 222.

Эффективность медленного вывода

Эффективность резонансного вывода можно оценить по формуле

$$\eta = \frac{1}{N} \int_{d} g(x) dx, \quad (1)$$

где N — число частиц в пучке; $g(x)=dN/dx$ — плотность частиц в поперечном сечении септумного магнита. Интеграл в формуле (1) берется по ширине магнитного зазора септума. Нетрудно показать, что при квадратичной зависимости приращения амплитуды бетатронных колебаний от величины амплитуды, как это имеет место в случае секступольного резонанса, интегральное распределение частиц в поперечном сечении септумного магнита находится в обратной зависимости от квадрата поперечной координаты:

$$g(x) = \frac{x_1 \cdot x_2}{(x_2 - x_1) \cdot x^2} \cdot N, \quad (2)$$

где x_1, x_2 — поперечные координаты, соответственно, ближнего края ножа септума и дальнего края магнитного зазора. Для (2) получаем

$$\eta \approx \frac{d}{d+t} \cdot \frac{x_1}{x_1+t}, \quad (3)$$

где t — толщина ножа септума.

На рис.2 приводится гистограмма распределения частиц в поперечном сечении септумного магнита при выводе пучка на секступольном резонансе, полученная численным моделированием. Из рисунка видно, что формула (2) неплохо аппроксимирует гистограмму.

Наладка и исследование резонансного вывода

Наладка вывода проводилась с протонным пучком, циркулирующим на площадке магнитного цикла, длительностью несколько сотен мс, при энергии частиц 1,5 ГэВ. Пучок выводился за апертуру вакуумной камеры при отрицательном угле отклонения в септумном магните и наблюдался в промежутке 202-203 с помощью люминисцентного экрана. Интенсивность выведенного пучка измерялась с помощью ионизационной камеры с точностью 10%.

Исходные характеристики выводимого пучка:		
Поперечный эмиттанс	$\epsilon_{x,y}$	10 мм·мрад
Бетатронные частоты	Q_r	9,21
	Q_z	9,27
Коэффициенты хроматичности	α_r	-5
	α_z	-20
Разброс частиц по импульсам		$2 \cdot 10^{-3}$
Дисперсия пучка по бетатронным частотам	ΔQ_r	0,01
	ΔQ_z	0,04

Опробовались два режима вывода: с быстрым смещением всего пучка в область резонанса (А) и плавного наведения пучка на резонанс (Б). Бунчированный пучок (синхр. частота 1 кГц) удавалось полностью вывести в обоих режимах с эффективностью около

50%. В режиме А пучок выводился с максимальной скоростью за время порядка 50 мс, при этом интенсивность выведенного пучка не стабилизировалась и

изменялась в процессе вывода в несколько раз. В режиме Б удавалось варьировать длительность вывода от 100 до 500 мс и стабилизировать интенсивность выведенного пучка с точностью 10—20% подбором закона изменения бетатронной частоты. Оптимальное смещение края ножа септума от равновесной орбиты при выводе оказалось в диапазоне от 15 до 20 мм при полуразмере огибающей пучка порядка 10 мм.

Численное моделирование процесса вывода

Программа численного моделирования процесса вывода была составлена на основе матричного метода расчета траекторий частиц в синхротроне. Нелинейные элементы представлялись плоскими линзами, возмущающими траекторию частицы ступенчатым изменением угловой координаты. Пучок задавался множеством частиц, каждая частица описывалась вектором координат в шестимерном фазовом пространстве. Начальное распределение множества частиц по поперечным координатам задавалось по закону Гаусса в нормализованном фазовом пространстве координат и углов. Распределение частиц по импульсам принималось равномерным.

В процессе моделирования исследовалась зависимость эффективности медленного вывода и эмиттанса выведенного пучка в поперечном фазовом пространстве от вертикального положения септума, дисперсии пучка по бетатронным частотам и нелинейного возмущения магнитного поля третьего и четвертого порядков.

На рис.3-4 показаны портреты поперечного фазового объема выведенного пучка без учета и с учетом разброса частиц по бетатронным частотам. Как видно из рисунков, дисперсия частиц по бетатронным частотам оказывает существенное влияние на величину эмиттанса пучка в вертикальной плоскости. Эмиттанс выведенного пучка в горизонтальной плоскости не отличается от эмиттанса циркулирующего пучка. Расчетная эффективность вывода в обоих случаях составляет 61%.

Исследовалось влияние на результат медленного вывода октупольной и декапольной нелинейности магнитного поля, приводящей к изменению зависимости приращения амплитуды колебаний от величины амплитуды и соответственно к деформации распределения частиц в сечении септумного магнита. Если функция нелинейности от азимута выбрана таким образом, что скорость роста амплитуды колебаний уменьшается с величиной амплитуды, плотность частиц на краю распределения увеличивается. При этом уменьшается заполнение частицами апертуры магнитного зазора септума, и эффективность вывода снижается. Неполное заполнение апертуры магнитного зазора септума можно компенсировать в определенных пределах увеличением силы секступольного резонанса.

На рис. 5-6 приводятся гистограммы распределений частиц в поперечном сечении септумного магнита при подобранном возмущении секступольного резонанса октупольной и декапольной нелинейностью магнитного поля. Как видно из рисунков, в обоих случаях удается уменьшить плотность частиц в области ножа септума по сравнению с исходным распределением (рис.2). Октупольная нелинейность, однако, не может увеличить эффективность вывода из-за возрастающих потерь частиц на хвосте распределения. Декапольная нелинейность

не создает длинного хвоста у распределения и позволяет реально увеличить эффективность вывода. Приведенная на рис.6 гистограмма показывает, что потери частиц на ноже септума вдвое меньше по сравнению с обычным режимом, при этом

эффективность вывода увеличивается до 80%. Анализ показывает, что октупольная нелинейность может быть использована для увеличения эффективности вывода на градиентном резонансе.

Заключение

Медленный вывод пучка из синхротрона У-10 с использованием секступольного резонанса налаживался и экспериментально исследовался на пучке протонов с энергией 1,5 ГэВ. Максимальная достигнутая эффективность вывода оценивается в 50%. Таким образом, показана практическая возможность медленного вывода ускоренного пучка из синхротрона У-10. Численное моделирование процесса вывода на секступольном резонансе показало, что его эффективность может быть существенно увеличена введением нелинейности четвертого порядка.

Литература

- [1]. Алексеев Н.Н., Большаков А.Е. и др. Труды XI Всес. сов. по ускор. зар. част. Дубна, 1989, т2, с.292.
- [2]. Strolin P., CERN 69-6.
- [3]. Y.Kobayashi. Nucl. Instr. and Meth. 83 (1970) 77.
- [4]. Большаков А.Е., Веселов М.А. и др. Препринт ИТЭФ, №29 (1978).
- [5]. L.J.Lindgren, M.Eriksson. Nucl. Instr. and Meth. 214 (1983) 179.
- [6]. Н.Н.Алексеев, Г.Н.Акимов и др. Внутренний отчет ИТЭФ №934 (1996).

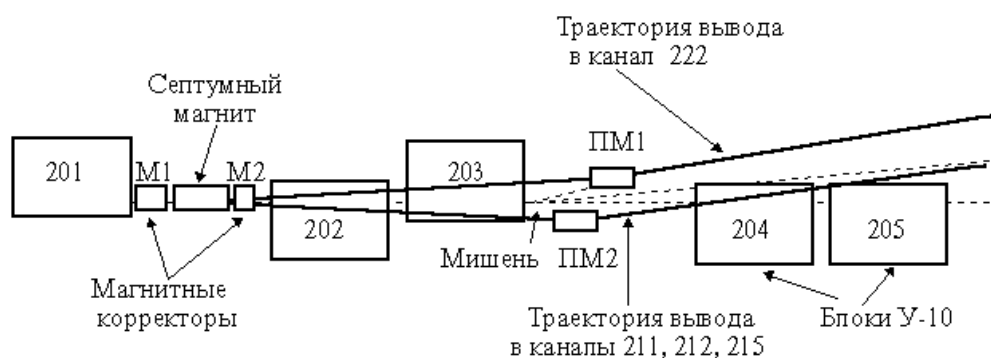


Рис.1. Схема направлений медленного вывода пучка из синхротрона У-70.

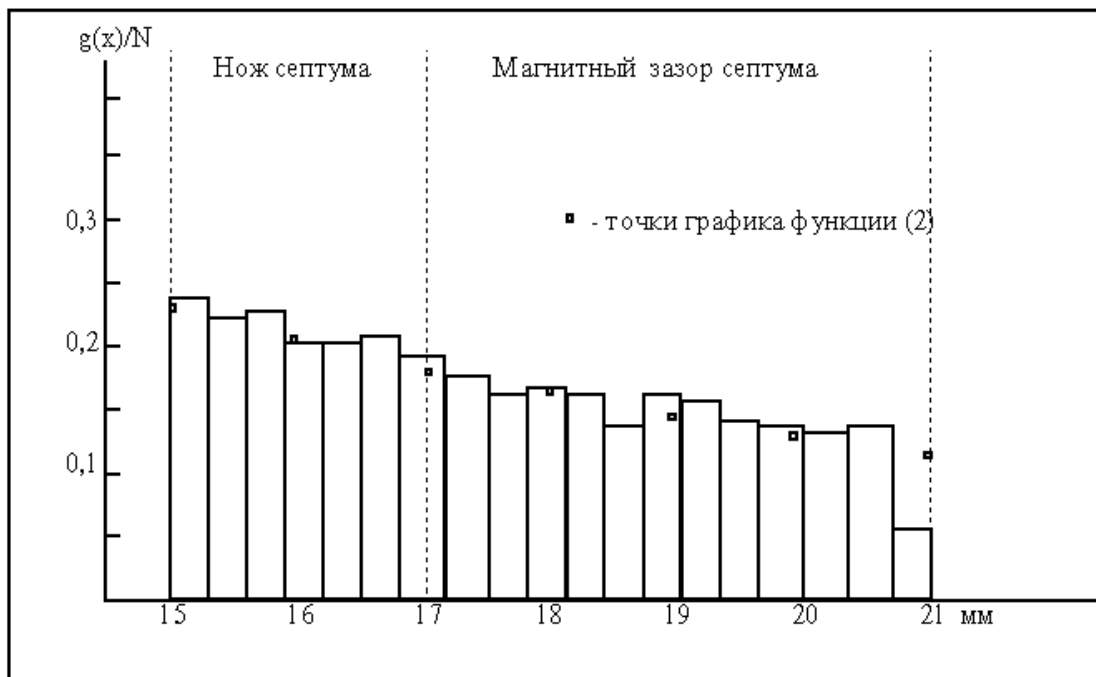


Рис.2. Распределение частиц в поперечном сечении септумного магнита при выводе на секступольном резонансе.

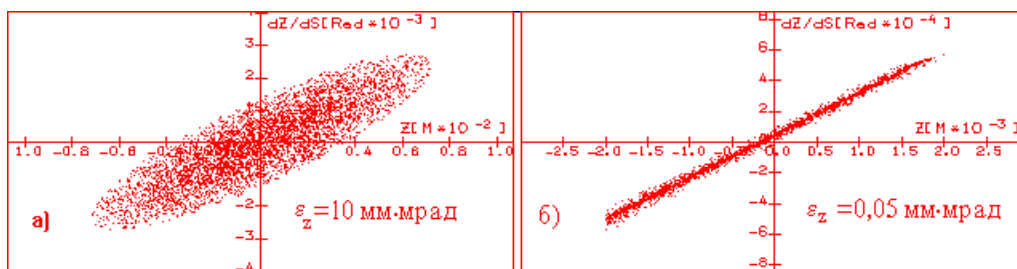


Рис.3. Эмиттанс пучка в вертикальной плоскости при нулевой дисперсии частиц по бетатронным частотам.

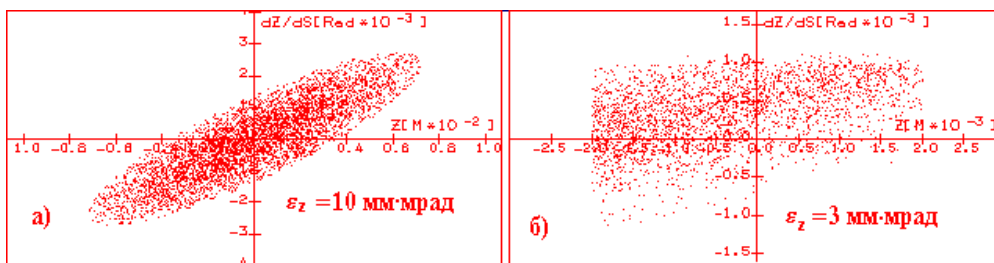


Рис.4. Эмиттанс пучка в верт. пл. при реальном разбросе частиц по бетатронным частотам.

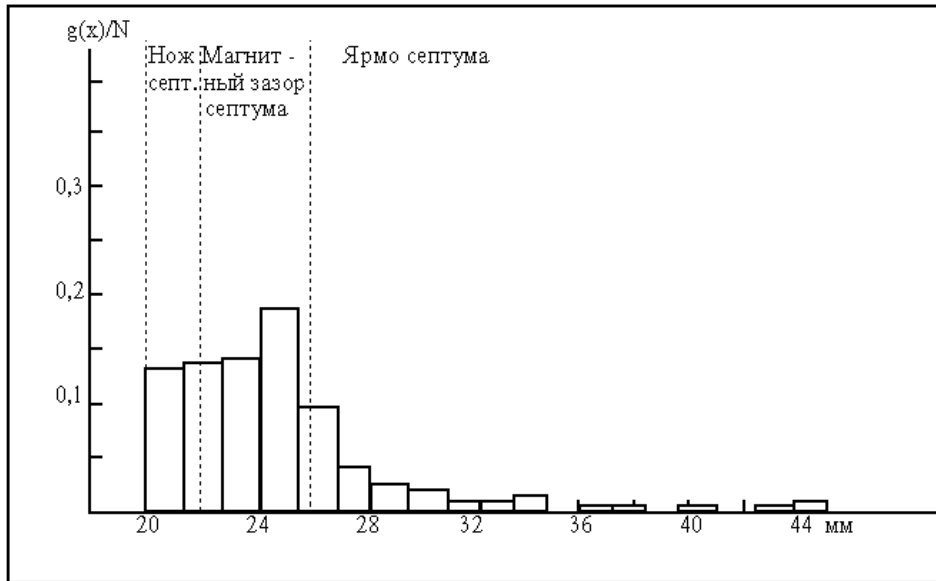


Рис.5. Распределение частиц в поперечном сечении септумного магнита при октупольном возмущении секступольного резонанса.

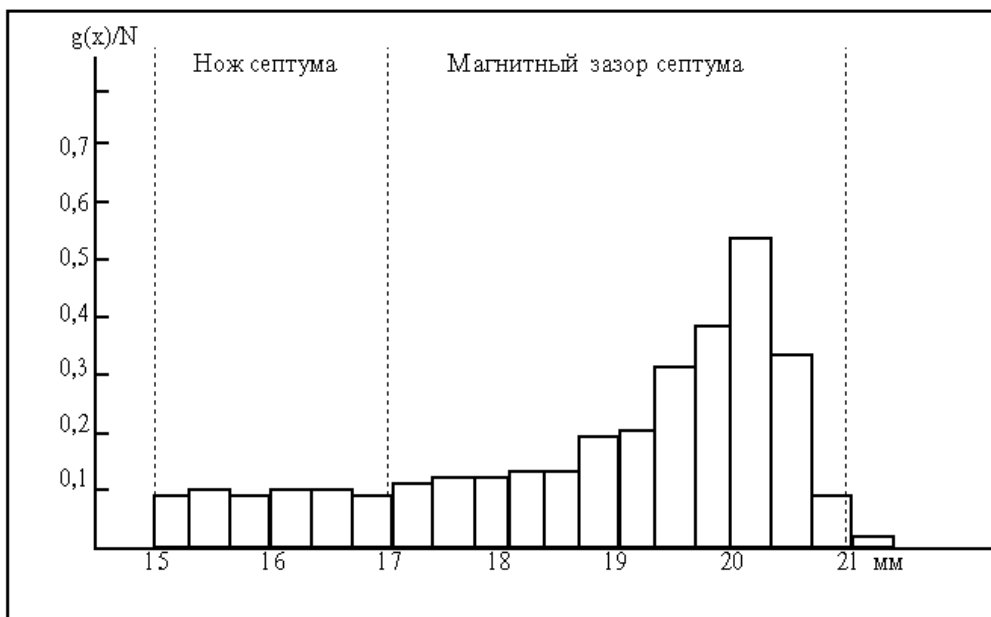


Рис.6. Распределение частиц в поперечном сечении септумного магнита при декапольном возмущении секступольного резонанса.